

AMELIORATION DES PERFORMANCES DES CARENES DE CANOËS-KAYAKS DE SLALOM ET DE DESCENTE

IMPROMENT OF THE PERFORMANCES OF SLALOM OR WILD WATER CANOE-KAYAK HULLS

S. HUBERSON, M. GUILBAUD, M. VOISINE ET T. GRELAUD

Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques (UMR CNRS n°6609), Université de Poitiers

Résumé

On présente les résultats d'une étude d'optimisation de carènes de canoës ou de kayak de slalom ou de descente à partir d'une méthode d'algorithme génétique couplé au code de calcul de résistance de vagues Poséidon. Le but est d'améliorer la vitesse des bateaux entre deux portes sans en détériorer les qualités de manoeuvrabilité et de tenue à la mer. L'optimisation est mono-objectif et ces qualités sont représentées par six contraintes à préserver ces qualités. Les carènes sont définies par 6 "gènes" géométriques. A partir des contraintes, nous avons définis deux indices, correspondant à la manoeuvrabilité et la tenue à la mer. L'indice de manoeuvrabilité a été ensuite comparé aux résultats de la version instationnaire du code Poseidon pour un bateau oscillant en lacet (simulant la manoeuvre en zigzag dite Kempf) pour dégager un nouvel indice plus représentatif de cette qualité.

Summary

The hulls of slalom or wild water canoe or kayak have been optimized using a genetic algorithm coupled with the numerical code Poseidon (wave resistance version). The goal is to increase the boat velocity between two gates without decreasing the manoeuvring and seakeeping qualities. A mono-objective optimizer was used together with six constraints representing these qualities. The hull shapes were defined by six parameters. From the constraints, two measures of merit corresponding to the manoeuvring and seakeeping qualities were defined. The manoeuvring measure of merit has been compared to the unsteady results of code Poseidon for a hull in oscillation yaw (simulating the Kempf zigzag) and an improved measure of merit was derived.

1. INTRODUCTION

Trois qualités sont principalement recherchées dans un canoë/kayak : la vitesse, la manœuvrabilité et la stabilité. Il est évident que les différentes disciplines en canoë kayak ne privilégient pas les mêmes qualités. En ce qui concerne le kayak de vitesse, par exemple, on donne bien sûr plus d'importance à la vitesse, ainsi on obtiendra des bateaux de section triangulaire (en «V»), assez peu manœuvrants, mais très rapides. Par contre, en kayak de slalom, la forme du bateau dépend des préférences de l'athlète, de sa technique pour passer les portes et de sa force musculaire. Certains sportifs vont donc opter pour un kayak à fond plat très manœuvrant, alors que d'autres préféreront un kayak plus proche de ceux utilisés en course de vitesse.

Actuellement, cette conception ne repose sur quasiment aucune donnée scientifique, et les professionnels se fient uniquement à leur expérience en la matière pour mettre en forme de nouveaux bateaux. Une fois moulés, ces derniers sont d'ailleurs bien souvent optimisés par ponçage ou ajout de matière par les athlètes eux-mêmes, dans le but d'améliorer leurs performances.

L'objectif de cette étude est d'offrir aux athlètes et aux entraîneurs, mais aussi aux constructeurs, un moyen d'améliorer les formes de carènes en fonction des spécificités des athlètes et des plans d'eau. On présente une étude d'optimisation des carènes de canoës ou de kayaks de slalom et de descente à l'aide d'un algorithme génétique et de calculs hydrodynamiques stationnaires ou instationnaires (domaine fréquentiel), en utilisant le code Poséidon Boin [1], Maury & al. [2]. Celui-ci est inséré dans une boucle itérative mettant la coque en équilibre, avec à chaque fois, détermination de la partie immergée de la coque.

On a donc cherché optimiser la vitesse entre deux portes tout en préservant les qualités de manœuvrabilité et de tenue à la mer en utilisant des contraintes. Celles-ci sont définies par comparaison à une forme de référence supposée suffisamment performante dans ces 2 domaines, mais dont la vitesse entre 2 portes peut être améliorée. De nouvelles formes de coque sont obtenues par application de transformations élémentaires à partir d'une coque initiale dans le but d'obtenir une description paramétrique des bateaux. Les deux critères caractérisant les qualités de manœuvrabilité et de tenue à la mer sont construits à partir de combinaison des caractéristiques géométriques des bateaux. Ces combinaisons sont définies à l'aide de considérations empiriques. Les résultats sont présentés sous la forme d'un pseudo " front de Pareto " en fonction de la résistance à l'avancement en fonction des deux critères ou fonction de mérite. Dans un second temps, on a cherché à vérifier la justesse de ces critères, et éventuellement de les améliorer, grâce à l'étude numérique d'un bateau oscillant autour de sa position moyenne en eau calme (configuration se rapprochant de la manœuvre de Kempf, en zigzag). On a utilisé ici la partie instationnaire du code (domaine fréquentiel). Les deux difficultés majeures ont été, d'une part, de caractériser la manœuvrabilité d'un canoë grâce aux résultats fournis par Poséidon, et d'autre part, de trouver un moyen de « prédire » ces résultats uniquement à l'aide des données géométrique du bateau. En effet, les calculs instationnaires nécessitant près de deux heures par canoë, il n'est pas possible de les effectuer à chaque fois que l'on veut évaluer les performances d'un bateau. En prévoyant d'une manière approchée mais validée les résultats sans faire de longs calculs, l'athlète pourra écarter les canoës médiocres et ne lancer de longs calculs, plus précis, que pour les canoës les plus prometteurs.

2. CALCULS NUMERIQUES

2.1 Hydrodynamique

On utilise un système de référence fixé au bateau. L'origine est située au milieu du bateau dans le plan de flottaison. L'axe x est dirigée vers l'avant et l'axe z est positif vers le haut; l'axe y complète le trièdre. Le plan $z=0$ correspond à la position non perturbée de la surface libre. Le calcul hydrodynamique de résistance à l'avancement, soit la version

stationnaire du code Poseidon, a été imbriqué dans une boucle déterminant la position exacte de la coque (assiette et immersion) pour une vitesse donnée, avec remaillage par des panneaux quadrilatéraux de la partie immergée de la coque à chaque itération. On obtient la convergence pour l'équilibre à l'aide de critères sur la force verticale et le moment de tangage, au maximum en 5 itérations. On obtient la traînée de vague du modèle; en utilisant la loi simple préconisée par ITTC57 pour le frottement visqueux sur la carène, on calcule ensuite la traînée de frottement, puis par sommation on obtient la traînée totale.

2.2 Algorithme génétique

L'algorithme génétique utilisé est GADO (Genetic Algorithm for Continuous Design Optimization) développé par Rasheed [3]. GADO est un algorithme mono-objectif, on ne peut fixer qu'un seul critère d'optimisation alors que le nombre de contraintes n'est pas limité.

L'objectif est de déterminer le ou les individus optimaux relativement à un critère, avec ou sans contraintes. Le critère constitue ce que l'on appelle la fonction objectif. Le degré d'adaptation (fitness) au problème recherché est quantifié par le biais d'évaluateurs externes à l'algorithme et dépend de son éloignement de la fonction objectif. Le degré d'adaptation de chaque individu est déterminé par la somme d'une mesure de mérite calculée par un module externe (la traînée du kayak ici) et d'une fonction de pénalité. Cette fonction de pénalité est le produit d'un coefficient de pénalité adaptatif (λ) et de la somme des violations des contraintes.

$$\text{Adaptation} = \text{Traînée totale} + \lambda (c1 + c2 + \dots + cn)$$

Le coefficient de pénalité dynamique (λ) permet de considérer, pour l'itération suivante, l'individu satisfaisant au mieux les contraintes d'une part et celui possédant le meilleur coefficient d'adaptation d'autre part. L'évolution du coefficient est expliqué dans [3].

Chaque nouvelle coque à partir d'une coque de référence par une transformation géométrique définie par 5 paramètres. On a utilisé ici une coque de "référence" appelé "Adfor", figure 1. On utilise 3 déformations homothétiques dans les 3 directions (H_x , H_y et H_z) et 2 déplacements des positions des largeur et immersion maximales de la coque (positifs vers l'aval et négatif vers l'amont, soit D_{bas} et D_{large}). Ces 5 valeurs sont données adimensionalisées par la longueur totale du bateau auxquelles on a retranché 1 de façon que le bateau original ait ses 5 paramètres égaux à 0. Un sixième paramètre définit la position du centre de gravité. Pour éviter d'obtenir des formes de coques limitées aux courses de vitesse en eau calme, on a ajouté 6 contraintes (3 pour la manœuvrabilité et 3 pour la tenue à la mer) pour modéliser ces qualités, Voisine [4].

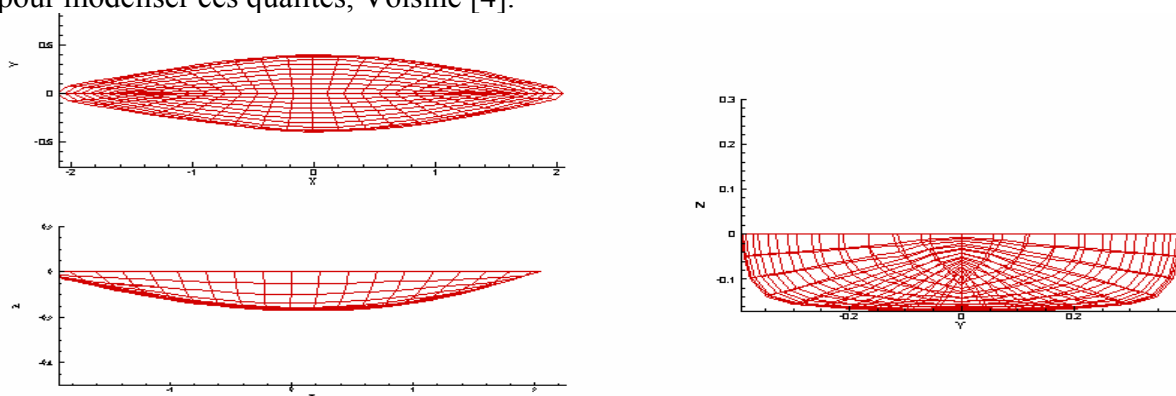


Figure 1. Canoë Adfor

Les 6 contraintes utilisées sont les suivantes:

- Le moment d'inertie par rapport à l'axe transversal y , représentant la capacité pour le canoëiste de changer rapidement l'assiette α pour faire un virage serré. Il est défini par

$$c1 = -g\rho d\alpha \int_{x_{BF}}^{x_{BA}} x^2 l(x) dx \quad (l(x) \text{ étant la distribution de largeur de la carène sur la ligne de}$$

flottaison, g est l'accélération de la pesanteur, ρ la masse volumique de l'eau). Ce choix est lié à des observations faites sur l'effet "savonnette", qui consiste, par un brusque déplacement vers l'arrière du kayakiste, à "planter" l'arrière du bateau dans l'eau et ainsi profiter de la propulsion générée par la force de flottabilité pour effectuer un virage serré au moment de passer une porte. D'une part, cette technique permet de ralentir le bateau et facilite la rotation, d'autre part la poussée engendrée quand l'arrière sort de l'eau facilite la relance. Cette technique sera d'autant efficace que la force nécessaire pour basculer le bateau vers l'arrière est faible. Celle-ci est inversement proportionnelle à la résistance au tangage qui augmente avec le moment d'inertie de la largeur de la section par rapport à l'axe y . Ce paramètre est donc important pour la manoeuvrabilité du bateau : plus ce moment d'inertie de celui-ci est grand plus le kayakiste aura de difficulté à faire varier l'assiette de son bateau pour pouvoir profiter de l'effet "savonnette". Le moment d'inertie du nouveau kayak doit donc être inférieur ou égal à celui du kayak de référence. La variation du moment d'inertie ne peut cependant être laissée totalement libre car elle peut nuire à la « tenue à la mer » du bateau, c'est à dire à son aptitude à rester stable dans les vagues. En effet, cette aptitude est fortement reliée au volume de flottabilité disponible à l'avant et à l'arrière du bateau. Il faut donc définir des limites aux variations du moment d'inertie. Ainsi, $c1$ est une bonne indication du moment à appliquer pour changer l'assiette du bateau. Plus sa valeur est grande, plus il est difficile de modifier l'assiette du navire. Notons enfin que le bon compromis *tenue à la mer/manoeuvrabilité* dépend évidemment du type de course et du plan d'eau.

- L'intégrale de la courbe de contour $C(x)$, représentant le moment de lacet dû à la traînée de frottement des sections transversales, $c2 = \int_{x_{BF}}^{x_{BA}} |x|^3 C(x) dx$. Cette intégrale est liée à la partie de

la résistance à la giration due au frottement de l'eau sur la carène d'un bateau lors d'un mouvement de lacet. On peut l'estimer aussi à partir de la formule préconisée par IITC57. Cette composante de la force génère un moment résistant autour de l'axe z . Ce moment est proportionnel à une intégrale sur la longueur du bateau. Nous supposons que l'axe instantané de rotation est un axe vertical coïncidant avec l'axe du repère de définition du bateau. Il s'agit là d'une approximation qui peut être assez grossière dans certain cas, mais qui est suffisante pour notre objectif. Celui-ci, rappelons le, n'est pas de fournir la valeur exacte du couple résistant mais simplement de construire un critère quantitatif représentatif de l'aptitude du bateau à la giration. On cherche à minimiser cette intégrale, ou tout du moins de ne pas trop s'éloigner de la valeur initiale du canoë de référence *Adfor*.

- Les deux contraintes suivantes sont respectivement la valeur moyenne et la variance $c3 = K \int_{x_{BF}}^{x_{BA}} xA(x) dx$ $c4 = K \int_{x_{BF}}^{x_{BA}} (x - c3)^2 A(x) dx$ de la courbe des aires $A(x)$ du bateau, supposés représenter la capacité à naviguer dans les vagues. Cette relation entre la courbe des aires et la tenue à la mer a été remarquée initialement par l'architecte naval Colin Archer. La forme de la courbe des aires détermine également le champ de vagues engendré par le bateau. Elle caractérise donc la capacité du bateau à conserver sa vitesse dans les vagues. Là encore, nous admettons que la courbe des aires du canoë de référence est satisfaisante et nous cherchons à nous en rapprocher le plus possible. Nous espérons, en maintenant les valeurs de ces contraintes proches de celles du canoë original, en conserver les qualités. Le coefficient $c3$ caractérise la symétrie de la courbe. Elle devrait se situer aux alentours de 0. Le coefficient $c4$ représente l'étalement de la courbe : plus $c4$ est grand, plus la courbe est plate et étalée. Ces paramètres devront s'éloigner le moins possible de ceux de la courbe initiale; ils quantifient la différence entre les valeurs obtenues pour un bateau et les valeurs correspondantes du bateau initial.

- La valeur de l'intégrale $c5 = \sqrt{\int_{x_{BF}}^{x_{BA}} |Rc_{\min ini}(x) - Rc_{\min}(x)| dx}$ du rayon minimum de courbure, , supposée fournir une mesure du risque de décollement de la couche limite et de

création d'un tourbillon secondaire entraînant une augmentation conséquente de la traînée de forme. Si la rupture de pente est trop importante, on risque un décollement de la couche limite après lequel il peut y avoir recollement. Il faut donc chercher à reculer au maximum le point de décollement afin de minimiser la traînée de sillage créée par celui-ci. Pour étudier ce décollement, nous nous plaçons simplement dans un plan transversal et nous considérons l'écoulement secondaire dans celui-ci. Le point où le rayon de courbure est minimum est en général assez proche du point de décollement de la couche limite.

- Enfin, le dernier paramètre est basé sur la position du point de rayon de courbure minimum, $c6 = \sqrt{\int_{x_{BA}}^{x_{BF}} |y_{Rc\min ini}(x) - y_{Rc\min}(x)| dx}$. On a supposé que cela pouvait représenter,

pour l'athlète, la possibilité d'arrêter un mouvement de roulis à une valeur donnée, x_{BA} et x_{BF} étant respectivement les abscisses longitudinales de l'avant et de l'arrière de la partie immergée de la coque. Ce point peut-être considéré comme le point d'accroche du bateau lorsqu'on le penche sur le coté. Cette technique est utilisée par les kayakistes pour accrocher l'eau et mieux se relancer. Ce point est l'ordonnée du point de changement de pente entre le fond ($y=0$) et le flanc du kayak. Il ne faut donc pas que son ordonnée soit trop petite, c'est à dire que ce point soit trop près de la surface de l'eau. Sinon, le kayakiste peut chavirer en faisant « gîter » le bateau, c'est à dire en l'inclinant dans un plan transversal, de manière à provoquer un décollement volontairement. $y_{Rc\min ini}(x)$ correspond à la position du rayon de courbure initiale du bateau choisie comme référence à la même abscisse.

A partir des paramètres ou contraintes définis précédemment, on a cherché à construire des indicateurs qualifiant les qualités nautiques – manoeuvrabilité et tenue à la mer- des bateaux. En conséquence, la solution se distinguera de celle du canoë de vitesse obtenue par optimisation de la seule vitesse, donc sans contraintes. Afin de pouvoir étudier et comparer les différents canoës de manière facile et rapide, nous avons regroupé ces contraintes en 2 "indices", le premier pour la manoeuvrabilité et le second pour la tenue à la mer. De cette façon, chaque solution peut être représentée par un point dans un espace à trois dimensions ce qui nous permet d'obtenir ce que l'on peut appeler un « pseudo-front » de Pareto par rapport au trois critères d'optimisation retenus : vitesse, tenue à la mer, manoeuvrabilité. Le préfixe « pseudo » est utilisé ici pour indiquer qu'il ne s'agit pas d'une optimisation simultanément menée sur ces trois objectifs, mais résultant d'un tri *a posteriori* sur la valeur des deux critères précédents. L'interprétation des contraintes permet d'identifier les bateaux les plus performants en ce qui concerne la manoeuvrabilité ou la tenue à la mer. La différence essentielle avec le résultat que l'on aurait pu attendre d'un algorithme multi objectifs tient dans l'absence d'optimisation portant sur les groupements de critères représentant ces deux qualités. Il s'agit donc d'une démarche palliative, mais non optimale.

Nous disposons de 6 critères ou contraintes heuristiques, certains liés directement à la manoeuvrabilité, d'autres représentant plutôt la tenue à la mer. Ils ont été rassemblés en 2 groupes afin d'obtenir 2 indices différents: indice de manoeuvrabilité (ind_{man}) et indice de tenue à la mer (ind_{tam})

Ces 2 indices regroupent chacun trois critères :

- l'indice de manoeuvrabilité ind_{man} est construit à partir de l'inertie (par rapport à l'axe y), de la courbe des contours et de la valeur du rayon de courbure, soient les contraintes $c1$, $c2$, $c6$. L'inertie et le moment résistant à la giration (lié à la courbe des contours) sont des paramètres de manoeuvrabilités. Le rayon de courbure va jouer sur le décollement de la couche limite, donc augmenter ou non la traînée des différentes sections en cas de virage. Ces 3 critères sont donc représentatifs de la manoeuvrabilité.
- L'indice de tenue à la mer ind_{tam} regroupe les 2 paramètres sur la courbe des aires et celui sur la position du rayon de courbure ($c3$, $c4$ et $c5$). La courbe des aires permet de définir le comportement dans les vagues des carènes. Le point de courbure minimum

correspond au point pour accrocher l'eau utilisée par les kayakistes et caractérise donc la stabilité transversale.

Après avoir construit ces deux groupes de paramètres, nous pouvons essayer d'obtenir une représentation similaire à un front de Pareto, en considérant la traînée, un indice de performance et un indice de manœuvrabilité. Afin de déterminer ces indices, nous avons mis en place une formule barycentrique attribuant un poids à chaque paramètre. Les variables $c10$, $c20$, $c30$ représentent les valeurs initiales des paramètres, c'est-à-dire les valeurs calculées pour le canoë d'origine. Les valeurs des paramètres du nouveau canoë sont les $c1$, $c2$, $c3$. On rappelle les valeurs pour le canoë initial Adfor:

$$c10=1,33 ; c20=1,63 ; c30=0,00303 ; c4=0,4419, c5=0,1385 \text{ et } c6=1,8413.$$

$$ind_{man} = \frac{m_1 \cdot \frac{c1}{c10} + m_2 \cdot \frac{c2}{c20} + m_3 \cdot \frac{c3}{c30}}{m_1 + m_2 + m_3}, \quad ind_{tam} = \frac{m_1 \cdot \frac{c4}{c40} + m_2 \cdot \frac{c5}{c50} + m_3 \cdot \frac{c6}{c60}}{m_1 + m_2 + m_3}$$

La manoeuvrabilité sera d'autant meilleure que l'indice correspondant sera plus petit, $ind_{man} < 1$, ($ind_{man} = 1$ pour la coque Adfor). Pour l'indice de tenue à la mer, plus il est élevé, $ind_{tam} > 1$, meilleure sera la tenue à la mer de cette coque ($ind_{ten} = 1$ pour la coque initiale).

2.3 Validation des critères de manoeuvrabilité et de tenue à la mer

Nous examinons maintenant la possibilité de valider les critères empiriques précédents par le calcul. Nous utilisons pour cela le même code de calcul hydrodynamique Poseidon que pour l'optimisation de la vitesse, mais dans la version fréquentielle.

Pour étudier le mouvement d'un navire, dans un repère lié à celui-ci, les équations dérivant de la relation fondamentale de la dynamique appliquée au bateau, Triantafyllou et Hover [5], peuvent se simplifier en négligeant les termes d'ordre supérieur en utilisant un développement en série de Taylor. On utilise plusieurs hypothèses simplificatrices qui permettent de réduire la difficulté de l'étude de l'écoulement autour d'un navire en mouvement. La première consiste à considérer le problème d'un plan d'eau initialement au repos, c'est-à-dire sans vagues. On obtient alors:

$$X = m \left(\frac{\partial u}{\partial t} - rv - x_G r^2 \right); Y = m \left(\frac{\partial v}{\partial t} + ru + x_G \frac{\partial r}{\partial t} \right); N = I_{zz} \frac{\partial r}{\partial t} + mx_G \left(\frac{\partial v}{\partial t} + ru \right)$$

où m est la masse du navire, u et v sont les composantes de vitesse selon les axes x et y , r est la vitesse de rotation selon l'axe z . On appelle x_G l'abscisse du centre de gravité. X et Y sont les composantes selon x et y de la somme des forces s'exerçant sur la coque; N est le moment selon z s'exerçant sur la coque et I_{zz} est le moment d'inertie par rapport à l'axe z .

On considère que les valeurs de r et v restent faibles et on peut négliger les termes rv et $x_G r^2$. On obtient donc :

$$X = m \frac{\partial u}{\partial t}; Y = m \left(\frac{\partial v}{\partial t} + ru + x_G \frac{\partial r}{\partial t} \right); N = I_{zz} \frac{\partial r}{\partial t} + mx_G \left(\frac{\partial v}{\partial t} + ru \right)$$

Par un développement en série de Taylor pour les termes X , Y et N , en se limitant aux termes du premier ordre (modèle linéaire), et en appelant X' (respectivement Y' , N') la différence entre la force exercée par l'hélice, les rames ou tout autre moyen de propulsion, et la valeur de cette même force à l'état d'origine et en tenant compte de la symétrie bâbord/tribord, ($X_v, X_v, X_r, X_r, Y_u, Y_u, N_u$ et N_u) sont nuls, on obtient finalement:

$$(m - X_u) \dot{u} = X_u(u - U) + X'; (m - Y_v) \dot{v} + (mx_G - Y_r) \dot{r} = Y_v v + (Y_r - mu) r + Y'; (mx_G - N_v) \dot{v} + (I_{zz} - N_r) \dot{r} = N_v v - (N_r - mx_G u) r + N'$$

Ce sont donc ces trois équations qui régissent les mouvements du bateau. On ne peut cependant les appliquer que pour des déplacements proches d'un déplacement rectiligne vers l'avant à la vitesse U (u doit rester proche de U , et v et r proches de 0). Elles ne sont évidemment pas adaptées à l'étude de manoeuvres rapides par exemple mais elles sont par contre très intéressantes lorsque l'on veut connaître les effets de petites variations de vitesse sur l'équilibre d'un bateau, ou les forces nécessaires pour le faire entrer en rotation.

On peut remarquer que les termes qui correspondent à des dérivées par rapport à une accélération X_u, X_u, Y_v , sont en fait des masses ajoutées alors que les termes correspondant aux dérivées par rapport à une vitesse sont des termes d'amortissement. Ces trois termes peuvent être reliés à l'ensemble des manœuvres considérées plus haut comme représentatives des performances d'un canoë.

Aptitude au virage :

On peut alors considérer un bateau, avançant à la vitesse U , sans dérive et virant à la vitesse r constante. La majorité des termes sont alors nuls. Seule la troisième équation, correspondant à la rotation autour de l'axe z , nous intéresse pour l'instant. Elle devient alors:

$$N' = [N_r - m(x_G - c)U]r$$

N' correspond donc au moment nécessaire pour imposer une rotation constante de vitesse r au bateau autour d'un axe parallèle à z , d'ordonnée $y=0$ et d'abscisse $x=c$. C'est une méthode très simplificatrice mais néanmoins efficace pour avoir une idée de la manœuvrabilité. En effet, plus le bateau sera difficile à faire virer, moins il sera manœuvrant.

Notre but étant uniquement de comparer la manœuvrabilité de bateaux, la valeur de r n'a pas grande importance. Néanmoins pour obtenir un ordre de grandeur du moment réellement nécessaire pour faire tourner un canoë, il n'est pas inutile de prendre une valeur réaliste. Une étude a été menée sur des vidéos, par Bauer [8], afin de mesurer la vitesse de rotation des canoës et des kayaks lors des passages de portes (voir les résultats en annexe), ce qui nous permet de déterminer une valeur de r réaliste. Ainsi, pour toute l'étude, on utilisera $r=0,91$ rad/s, valeur assez élevée qui ne concorde pas avec l'hypothèse supposant r faible, mais dans la mesure où l'on mène une étude comparative, cela est acceptable. Cependant on ne pourra considérer cette évaluation de la manœuvrabilité que comme une évaluation de l'aptitude d'un bateau à tourner lentement (on peut penser qu'un bateau difficile à faire tourner à faible vitesse sera a priori plus difficile encore à faire tourner à vitesse un peu plus forte).

Aptitude à l'accélération :

On peut aussi calculer le mouvement de cavement provoqué par la force supplémentaire nécessaire pour que le bateau passe d'une vitesse U à une autre u , telle que $u > U$. Cette force supplémentaire s'exprime : $X' = -X_u(u - U)$. Elle sera négative si u est plus grand que U , car la force exercée par les pagaies sur l'eau est dirigée vers les x négatifs.

Aptitude à l'effet « savonnette »

Enfin pour caractériser l'effet savonnette, le coefficient d'amortissement en tangage (B_{55}) est proportionnel à la force nécessaire pour faire basculer le bateau autour de l'axe y .

Ainsi les résultats instationnaires de Poséidon permettent d'évaluer les performances d'un canoë dans trois des quatre domaines prépondérants de la manœuvrabilité (la tenue à la mer qui résulte directement du calcul ne sera pas étudiée ici). On cherchera donc à prédire au moins grossièrement cette qualité, afin de repérer les bateaux qui semblent performants, et ne lancer des calculs complets que pour ceux là. Pour atteindre ce but, on a donc effectué des calculs instationnaires pour une série de bateaux et sur une gamme de fréquences suffisamment étendue.

Pour valider les critères de manœuvrabilité, on a utilisé une corrélation très simple qui consiste à comparer les bateaux deux à deux. On a comparé les valeurs des indices de manœuvrabilité et les valeurs des moments N' . On a effectué ce test sur toutes les paires de bateaux possibles, et on calcule le pourcentage de résultats concordants. S'il est proche de 50%, c'est que le paramètre n'a pas d'influence sur la manœuvrabilité et on cherchera à définir des critères plus pertinents. En revanche, au delà de 70% on peut penser qu'il a effectivement un impact.

3. CALCULS EFFECTUES

3.1 Optimisation

Pour l'optimisation, la plupart des calculs ont été effectués avec un maillage, cf. Voisine [4], de 18×9 facettes sur une demie coque à la vitesse de 2,5m/s. Les calculs sont faits sur un cluster de PC, en utilisant 4 nœuds de 2 processeurs 2,8Ghz; le temps CPU varie de 4 à 8 jours suivant les paramètres utilisés dans le code de calcul. Les paramètres sont la géométrie du bateau de référence, une population initiale de 600 formes de coque et une population courante de 60 formes de coques.

Les calculs ont été effectués avec les paramètres suivants : $m= 150$ kg (15 kg pour le canoë et 135 kg pour deux athlètes) et vitesse : $U=2$ à 3 m.s⁻¹. En ce qui concerne les contraintes: $[-0,8-1,2]$ pour les trois homothéties, $[-0,2-0,2]$ pour les déplacements de couple large et bas (en mètres) et $[-0,4-0,4]$ pour le déplacement du centre de gravité (en mètres). La convergence est atteinte après environ 3501 coques analysées. L'influence des différents paramètres a été aussi étudiée pour éviter d'obtenir un optimum local.

3.2 Evaluation de critères de manoeuvrabilité

Pour rechercher les paramètres qui influent sur la manoeuvrabilité, la méthode utilisée est simple. On compare les valeurs d'un paramètre géométrique (gène contrainte, indices,...) avec les valeurs des moments nécessaires pour la rotation $N' = [N_r - m(x_G - c)U]r$. Pour cela on utilise une corrélation très simple qui consiste à comparer les bateaux deux à deux. On regarde quel bateau semble plus manoeuvrant selon le paramètre géométrique, et si ce bateau nécessite effectivement un moment plus faible pour la rotation, alors le test est positif pour cette paire de bateau. On effectue ce test sur toutes les paires de bateaux possibles, et on calcule le pourcentage de résultats positifs. S'il est proche de 50%, c'est que le paramètre n'a pas d'influence sur la manoeuvrabilité. En revanche, au delà de 70% on peut penser qu'il a effectivement un impact. Les calculs des coefficients de masse ajoutée et d'amortissement ont été effectués pour 45 formes différentes de canoës, toutes déduites de la forme initiale Adfor. Les canoës choisis pour cette étude proviennent d'une série créée aléatoirement par le logiciel d'optimisation GADO, lors d'un calcul d'optimisation [6]. On a ajouté aux paramètres de la partie §3.1, des pulsations correspondant à des périodes de $\frac{1}{2}$ à 3 secondes ce qui est réaliste, en se limitant ici à des vitesses d'avance de 2 m/s. On a donc calculé tous ces bateaux avec la version instationnaire de Poséidon, après les avoir mis en équilibre avec la version stationnaire du code. A partir des comparaisons sur 21 formes (210 cas), on a déterminé un nouvel indice permettant des corrélations supérieures à 85%. Pour valider ces résultats, on a étendu les calculs aux 19 bateaux non utilisés pour définir ce nouvel indice. Enfin, pour s'affranchir du fait que toutes les formes dérivent d'une même forme de base, on a défini 14 nouvelles formes (91 cas), pour lesquelles on a refait les mêmes calculs, limité à 2 fréquences pour des raisons de temps de calcul. Des corrélations croisées ont été évaluée entre les 2 familles de bateau (630 cas de comparaison entre deux formes de famille différente), puis sur les 59 bateaux (1711 cas).

4. RESULTATS

4.1 Calculs d'optimisation

On a pu ainsi construire le pseudo le front de Pareto présenté sur la figure 2. La résistance à l'avancement est tracée en fonction de l'indice de manoeuvrabilité, les couleurs indiquant celui de tenue à la mer. On peut diviser les bateaux en groupes différents: le groupe B (exemple carène n°486, figure 3) correspond à des carènes ayant une faible traînée. Cependant, on peut observer que la plupart des bateaux de ce groupe ont aussi une valeur élevée de ind_{man} ce qui signifie qu'ils ont une mauvaise qualité de manoeuvrabilité. Ces bateaux sont proches de ceux des courses de vitesse; ils ont un couple large fortement décalé vers l'arrière et une grande longueur. Le second groupe, A, (carène 65, figure 3) correspond à des bateaux manoeuvrants mais lents ; certains d'entre eux ont aussi de bonnes qualités de

tenue à la mer. Entre ces deux extrêmes, on peut trouver des formes (carène 808) combinant de bonnes qualités de manœuvrabilité et/ou de tenue et la mer et des traînées faibles : le bateau optimal doit se trouver dans cette zone. Le tableau 1 donne les valeurs des paramètres des ces bateaux ainsi que le résultat ultime du calcul d'optimisation.

	H_x	H_y	H_z	$Dbas$	$Dlarge$	X_g	Trainée	ind_{man}	ind_{tam}
Kayak 65	-0,063	-0,09	0,1	-0,19	0,095	-0,034	59,43	0,87	-2,943
Kayak 486	0,2	-0,2	0,198	0,2	-0,2	-0,22	30,48	1,698	-23,33
Kayak 808	0,077	-0,2	0,2	-0,14	0,12	-0,03	41,29	1,041	-2,539
Kayak 3501	0,0499	-0,074	0,0364	0,0005	0,066	0,0529	43,313	1,071	6,569

Tableau 1

Par ailleurs, on observe que les valeurs des paramètres géométriques (les gènes) ne s'approchent pas des bornes de leur intervalle de variation que nous avons fixées *a priori* arbitrairement. Ce n'est plus le cas par contre pour des vitesses plus grandes, $U=3,5\text{m/s}$, par exemple pour l'homothétie dans la direction axiale car le couple large se bloque sur la position la plus reculée.

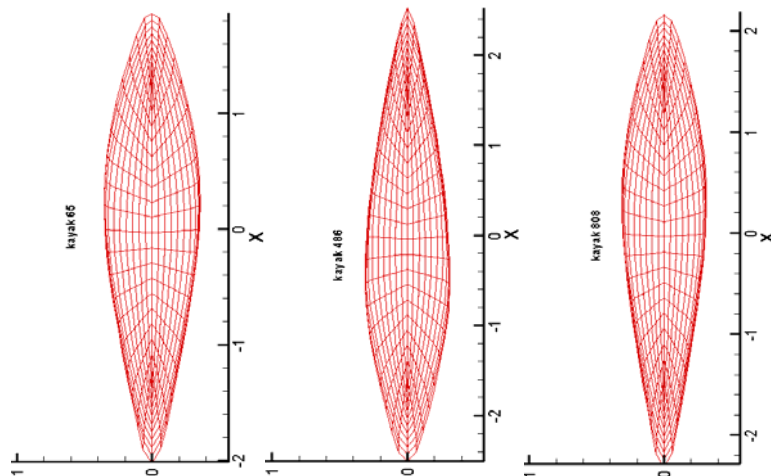


Figure 3. Canoës du front de Pareto

La figure 4 représente l'évolution des contraintes en fonction des itérations de calcul. Lorsque les contraintes sont nulles, elles vérifient les limites imposées. On s'aperçoit tout de suite que certaines contraintes sont plus facilement vérifiées que d'autres. Les limites imposées pour le moment d'inertie, l'espérance et la variance ne posent aucun problème. Par contre, les trois autres bornes posent des problèmes. La première concerne le moment résistant à la giration (contrainte $c2$, intégrale x^3). On observe bien une convergence du critère mais celle-ci est très lente. A la fin des itérations toutes les carènes ne vérifient pas le critère. Il est donc peut-être trop difficile d'obtenir des résultats assez proches de l'intégrale d'origine à $0,2 \text{ m}^5$ près. En augmentant la borne de la contrainte $c2$ ou de $c6$, on devrait trouver sans trop de problème d'autres formes. La difficulté la plus flagrante sur le choix de la borne de contraintes provient du rayon de courbure ($c5$). Ce critère est vérifié pour la quasi-totalité des carènes utilisées. Il faut donc diminuer son intervalle de variation pour en faire un critère vraiment sélectif. Toutefois cela est probablement du à la façon dont les nouvelles formes de canoës sont obtenues, qui fait que le rayon de courbure ne varie que très peu entre la forme initiale et la forme modifiée. Nous avons ensuite réalisé des calculs complémentaires pour lesquels la borne de contrainte sur l'intégrale en x^3 est augmentée (contrainte $c2$): on accepte donc des carènes « moins manoeuvrantes », le résultat que l'on doit obtenir est une réduction de la traînée. Les indices de manoeuvrabilité et de tenue à la mer vont être modifiés. D'autre part, on a autorisé une valeur plus grande pour la position du rayon de courbure $c6$.

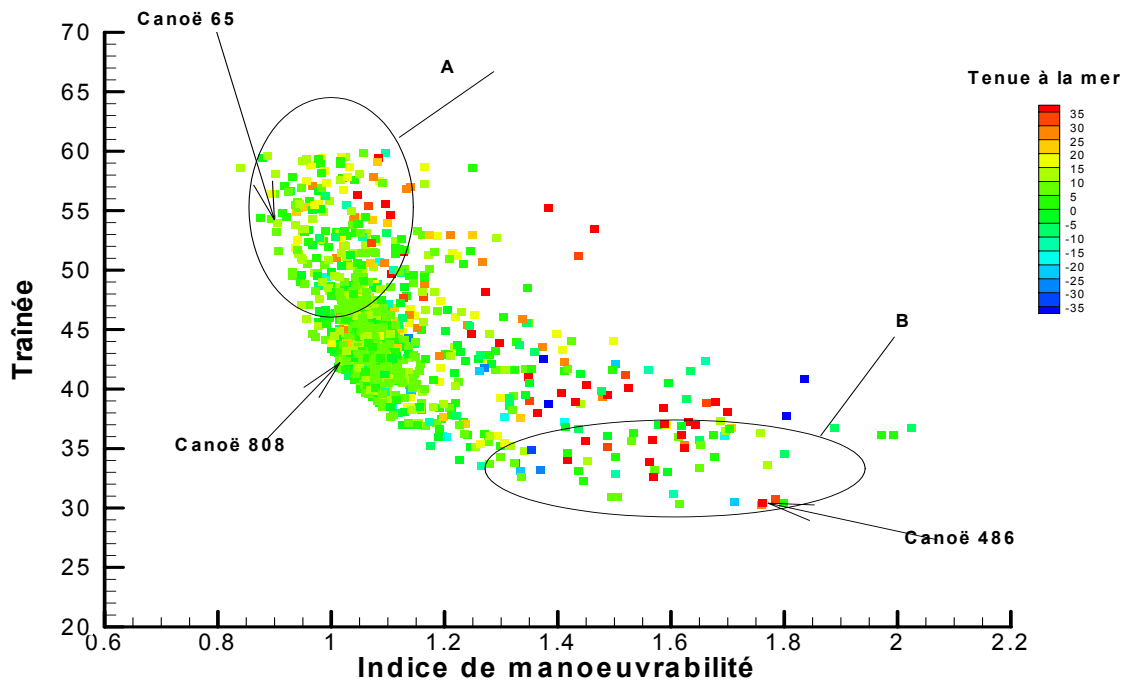


Figure 2. Pseudo-front de Pareto

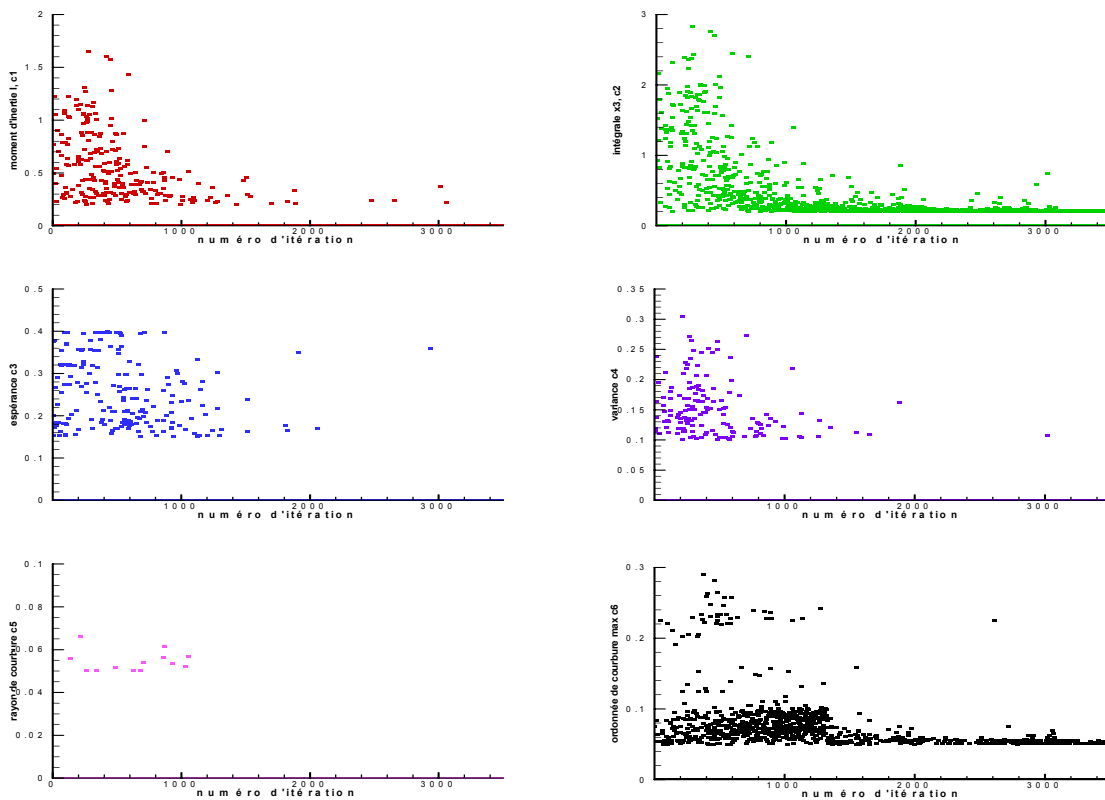


Figure 4. Evolution des contraintes au cours de l'optimisation

Afin d'étudier l'influence de la valeur des bornes, nous avons réalisé un calcul avec une nouvelle valeur de la borne, pour la contrainte c_2 , soit $<0,15$. La figure 5 correspond au calcul réalisé pour une borne de contrainte de 0,15, toujours comparé à la borne 0,2. Dans cette situation on doit donc augmenter la traînée et modifier les indices de manoeuvrabilité et de tenue à la mer. On s'aperçoit, tableau 2, que les 2 canoës ne sont pas très différents. En diminuant la borne de la contrainte on souhaitait obtenir une meilleure manoeuvrabilité tout

en sachant que l'on pénaliserait la traînée. Le gain en terme de manoeuvrabilité est très faible tout comme la perte au niveau de la traînée. Par contre l'écart le plus sensible vient là encore de la tenue à la mer.

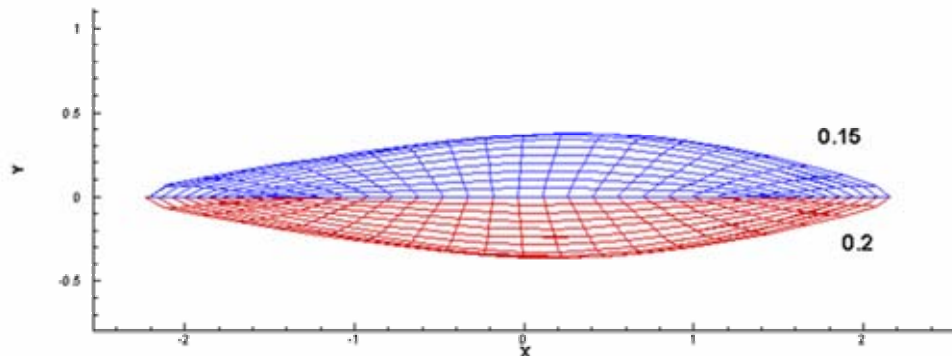


Figure 5. Comparaison des formes pour 2 valeurs de la contrainte c_2

	H_x	H_y	H_z	D_{bas}	D_{large}	X_g	Traînée	ind_{man}	ind_{tam}
$x_3 < 0,2$	0,0499	-0,074	0,03638	0,000495	0,0662	0,0529	43,313	1,071	6,569
$x_3 < 0,15$	0,0443	-0,046	0,059	0,0598	0,123	0,084	43,75	1,057	10,045
	Manoeuvrabilité			Tenue à la mer					
	Inertie c_1	Intégrale x_3 c_2	Ordonnée de courbure c_6	Espérance c_2	Variance c_3	Rayon de courbure c_5			
$x_3 < 0,2$	8,50E-02	0,2	4,92E-02	5,01E-02	4,24E-02	9,39E-03			
$x_3 < 0,15$	7,25E-02	0,1498	4,96E-02	8,17E-02	3,57E-02	1,55E-02			

Tableau 2. Résultats de carène convergée en fonction de la borne sur la contrainte moment résistant à la giration – intégrale $x^3 c_2$

Le bas du tableau 2 nous permet de constater que le coefficient d'aplatissement a un effet prépondérant sur la valeur de la tenue à la mer. En diminuant la borne de la contrainte on a bien obtenu le résultat attendu, une légère augmentation de la traînée pour une meilleure manoeuvrabilité, mais aussi une meilleure tenue à la mer. Les formes sont comparées sur la figure 5. Ce travail a été effectué pour les deux autres contraintes et pour l'effet de la vitesse.

4.2 Calculs de validation des contraintes

Les premiers résultats obtenus pour l'indice de manoeuvrabilité ont donné des corrélations faibles (inférieures à 60%). Toutefois, cela ne veut absolument pas dire que l'indice lui-même soit mauvais. Si l'on se penche sur les contraintes utilisées pour le calcul de cet indice, on remarque que la première évalue le frottement de l'eau sur la carène, et la seconde, les éventuels décollements de couche limite, or le calcul instationnaire de Poséidon fait l'hypothèse de fluide parfait. Enfin la troisième mesure l'efficacité de l'« effet savonnette », qui, bien que pouvant être considéré comme un critère de manoeuvrabilité, ne peut en rien être corrélé avec le moment nécessaire à la rotation. Il est donc logique que l'on obtienne une piètre corrélation. On a donc cherché d'autres paramètres géométriques scalaires pouvant être corrélés avec le moment nécessaire à la giration. On a donc utilisé les autres paramètres disponibles, c'est-à-dire : les cinq déformations de forme de carène, la position du centre de gravité ; les rayons de courbure minima et les positions des points de courbure minimale et les 2 paramètres de la courbe des aires. Les résultats ont dégagé un certain nombre de points:

➤ L'écart entre le centre de gravité et l'abscisse de l'axe de rotation, donne un taux de corrélation autour de 85% pour toutes les fréquences. En effet la position du centre de gravité intervient directement dans le calcul du moment nécessaire à la giration. Ceci semble montrer que la manoeuvrabilité d'un bateau est meilleure si le centre de gravité est situé devant l'axe de rotation.

➤ L'homothétie en z conduit à un pourcentage de tests positifs de l'ordre de 60%. Une homothétie d'axe Oz trop importante crée des bateaux à fond moins plats que le canoë d'origine, ce qui peut avoir pour effet d'améliorer la vitesse mais pas la manœuvrabilité. Néanmoins ce critère a été conservé car, d'une part il permet d'améliorer les résultats finaux, et d'autre part, il a logiquement un impact, même faible, sur la manœuvrabilité.

➤ Plus étonnant, le critère calculé à partir des positions des points de courbure minimale a permis d'obtenir un taux de corrélation de plus de 60%, alors que ce critère était au départ destiné à évaluer la tenue à la mer. Cependant, on rappelle que le point de courbure minimale est aussi le point de changement de pente entre le flanc et le fond du bateau. Or, le flanc, quasiment vertical, oppose beaucoup de résistance à la giration. C'est pourquoi la position des points de changement de pente a une influence sur la manœuvrabilité.

Cette observation a été à l'origine de l'établissement d'un nouveau critère sur la ligne de courbure minimale, qui, cette fois, n'a pas pour but de faire une comparaison avec le canoë de base, mais plutôt de donner une idée du moment résistant dû aux flancs du bateau. Il est calculé à l'aide de l'intégrale suivante (avec $p(x)$ cote de la ligne de changement de pente) :

$$M_{Chg} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} |x - c| p(x) dx, \text{ indice qui permet d'obtenir une corrélation d'environ 80\%.}$$

➤ De la même manière on établit un paramètre sur la ligne de fond égal à $M_{Fond} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} |x - c| h(x) dx$ (corrélation supérieur à 80%)

On peut maintenant, à l'aide des quatre paramètres sélectionnés, établir un nouvel indice de manœuvrabilité pour chaque bateau afin de prédire les résultats instationnaires de Poséidon, en sachant que cet indice ne tiendra compte que de la résistance de vagues de la rotation en z , et qu'il ne remplacera pas l'ancien indice mais le complètera.

Pour plus de clarté nous adopterons les notations suivantes :

$d_{grav} = x_G - x_{axe}$: distance algébrique entre le centre de gravité et l'axe de rotation
Hz	: (facteur homothétique en z) - 1
M_{Chg}	: paramètre sur la ligne de changement de pente
M_{Fond}	: paramètre sur la ligne de fond
I_{man}	: indice de manœuvrabilité établi par cette étude

On se limite, pour former ce nouvel indice, à faire une combinaison linéaire des quatre paramètres, et à effectuer une optimisation numérique pour trouver les quatre coefficients donnant les meilleurs résultats. Cette méthode a rapidement permis de définir le nouvel indice de manœuvrabilité :

$$I_{man} = 1,5 * Hz - 15 * d_{grav} + 8 * M_{Chg} + 15 * M_{Fond}$$

On a obtenu, avec cet indice, les pourcentages de corrélation suivants (toujours avec les 21 premiers bateaux, soit 210 tests):

Pulsation adimensionnée	Nombre de tests positifs	Pourcentage de tests positifs
1	182	86.7
1.5	188	89.5
2	194	92.4
2.5	197	93.8
3	201	95.7
3.5	200	95.2
4	197	93.8
5	185	88.1
6	197	93.8
7	197	93.8
8	195	92.9
10	182	86.7
12	191	91
15	193	91.9

On obtient donc pour ces bateaux des résultats très satisfaisants, mais pour vérifier le caractère prédictif de cet indice, il faut l'appliquer à des canoës n'ayant pas été utilisés dans la recherche des coefficients de la combinaison linéaire d'où l'intérêt de ne pas avoir effectué l'optimisation avec tous les bateaux. Ainsi, avec les 24 bateaux restants, soit 276 tests, pour la plage de fréquences réduite, nous obtenons :

Pulsation adimensionnée	Nombre de tests positifs	Pourcentage de tests positifs
1.5	249	90.2
2	260	94.2
3	266	96.4
4	257	93.1
5	243	88
6	253	91.7
7	235	85.1

On obtient donc des résultats aussi bons, ce qui permet de dire que l'indice de manœuvrabilité est valable pour l'ensemble des bateaux générés par le canoë Adfor.

Pour l'ensemble de la série on a les résultats suivants :

Pulsation adimensionnée	Nombre de tests positifs	Pourcentage de tests positifs
1.5	893	90.2
2	930	93.9
3	950	96
4	929	93.8
5	880	88.9
6	917	92.6
7	887	89.6

On peut voir sur la figure 6 qu'une bonne approximation linéaire peut être utilisée pour relier l'indice de manœuvrabilité et le moment nécessaire à la giration, l'équation de la droite correspondante étant $y=3,37.10^{-2}x+1,8$, avec un coefficient de détermination R^2 de 0,945. Des résultats similaires ont été obtenus pour les autres fréquences. Il ne faut pas considérer ces valeurs comme ayant un sens par elle-même mais ces calculs permettent de comparer les carènes les unes par rapport aux autres, ce qui est d'ailleurs ce que l'on recherche ici.

Si on étudie les influences relatives des différents paramètres apparaissant dans notre nouvel indice, on s'aperçoit que le paramètre d_{grav} est le paramètre prépondérant pour l'estimation de la manœuvrabilité. Cependant M_{Chg} et M_{fond} ont aussi une grande importance. Par contre, Hz ne joue que très peu sur la valeur de l'indice.

Jusque là tous les calculs ont été fait sur des bateaux générés à partir du canoë de base Adfor. On est donc en droit de se demander si, avec un autre bateau générateur, l'indice de manœuvrabilité resterait valable. Pour le vérifier il a donc fallu effectuer les calculs instationnaires pour une autre série de bateaux, générés cette fois par un second canoë dont on possède également la géométrie. Pour des raisons de manque de temps la série se réduit à 14 bateaux et 2 fréquences. On obtient les corrélations suivantes (91 tests) :

Même si les corrélations sont moins bonnes que pour le canoë Adfor, elles sont tout de même plus qu'acceptables. On pourrait certainement les améliorer en refaisant une optimisation, pour calculer de nouveaux poids pour les paramètres. Seulement, avoir un indice de manœuvrabilité qui se calcule différemment selon le canoë à partir duquel le bateau a été généré n'est pas souhaitable. Et puisque en gardant les mêmes poids l'indice reste assez bon, il n'est pas utile de le changer.

Ces résultats suggèrent que, quel que soit le bateau générateur (dans la mesure où il ne diffère pas trop du canoë Adfor), l'indice de manœuvrabilité sera utilisable.

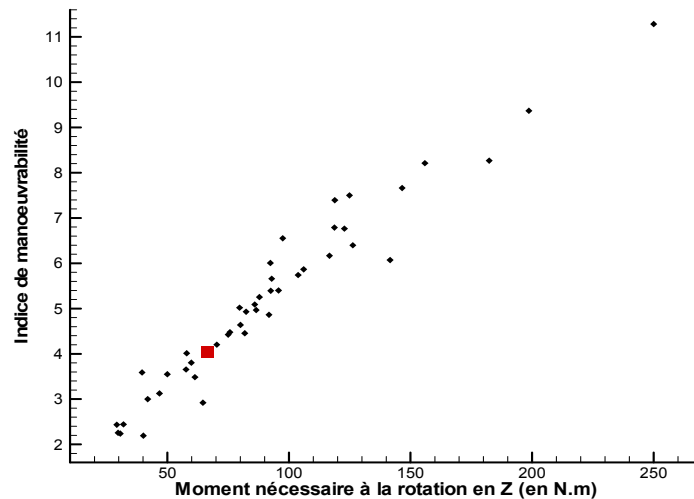


Figure 6. Indice de manoeuvrabilité en fonction du moment nécessaire à la giration pour les 45 bateaux, à $\omega^2=2$. Le carré rouge correspond au canoë d'origine Adfor

Pulsation adimensionnée	Nombre de tests positifs	Pourcentage de tests positifs
2	80	87.9
4	75	82.4

5. CONCLUSION

On a présenté des résultats de calculs d'optimisation de la vitesse de canoës ou kayaks de slalom ou de descente entre 2 portes, tout en veillant à ne pas pénaliser leurs qualités de manoeuvrabilité et de tenue à la mer. Cette optimisation a été effectuée en utilisant la version stationnaire du code de calcul Poséidon, associée au code d'optimisation par algorithme génétique GADO. Le navire est décrit par 6 gènes et les qualités de manoeuvrabilité et de tenue à la mer, sensées être prises en compte par 6 contraintes, groupées par 3 pour définir des critères représentant ces qualités. On a obtenu des résultats sous forme d'un pseudo "front de Pareto" utilisable pour le choix et la conception des coques en fonction des athlètes et des plans d'eau. Afin d'améliorer les critères utilisés, on a effectué une étude en instationnaire (similaire au test de zigzag) de manoeuvrabilité avec la partie harmonique du code Poséidon. A partir de corrélations entre les critères choisis a priori et les calculs de moment de lacet instationnaire, on a pu proposer des indices plus performants qui pourront être appliqués aux carènes les plus performantes;

6. REFERENCES

- [1] J-P.Boin "Calcul des efforts hydrodynamiques sur un navire soumis à une houle régulière ; application d'une méthode de singularité de Kelvin", Thèse doc., Poitiers, 2001.
- [2] C.Maury, G.Delhommeau, M.Ba, J.-P.Boin and M.Guilbaud, "Comparison between numerical computations and experiments for seakeeping on ship's models with forward speed", Journal of Ship Research, Vol. 47,4, p.347-364, 2003.
- [3] K.M.Rasheed, "GADO: a genetic algorithm for continuous design optimization", Ph.D, Rutgers University, New Jersey, 1998.
- [4] M. Voisine, "Optimisation numérique des formes de carène d'un canoë en eaux vives", Rap. de stage, LEA, 2005.
- [5] M. S. Triantafyllou and F. S. Hover, "Manoeuvring and control of marine vehicles", M.I.T., 2002.
- [6] T. Grelaud, « Étude de la manoeuvrabilité des navires Application aux canoës et kayaks de slalom », Rap. stage, LEA, 2006.
- [7] M.H.Nguyen, M.Ba, S.Huberson et M.Guilbaud, "Effets portants en écoulement hydrodynamique instationnaire en domaine fréquentiel", 11^{èmes} Jour. Hydro., France, 2007.
- [8] H. Bauer, "Modélisation de l'équipage d'un kayak de slalom", Rap. stage, LEA, 2005.